



基于区块链技术的非合作博弈共享储能交易模型

摘要

针对目前储能成本过高、缺乏交易平台导致的利用效率低下、收益较低等问题,设计基于区块链技术的非合作博弈交易模型.以微网作为节点引出共享储能的概念,利用数字签名技术进行节点身份验证,有效提高交易的安全性.基于智能合约自我驱动、自我执行的特征,建立共享储能交易机制.通过建立非合作博弈模型,实现各节点利益最大化,提高储能收益,提高节点用户参与交易的积极性,推动产业结构进一步优化.算例分析结果表明,本文所提出基于区块链技术的共享储能非合作博弈交易模型可以有效实现储能参与市场交易,提高储能利用效率,增加储能项目收益来源,为储能行业的进一步发展提供有效的技术支持和理论支撑.

关键词

共享储能;区块链;智能合约;非合作博弈

中图分类号 TM73

文献标志码 A

收稿日期 2022-01-13

作者简介

王珣,女,硕士,高级经济师,主要研究方向为电力市场.liujin202201@163.com

¹ 国网湖州供电公司,湖州,313000

0 引言

近年来,新能源发电得到快速发展,但作为新能源重要组成部分的风能及太阳能,输出功率具有随机性和间歇性特征,其装机容量的快速增长势必对电网调峰和系统安全带来影响^[1-3].储能技术能够在很大程度上解决新能源发电的波动性问题,缓解新能源大规模并网引起的系统不稳定性,同时也有利于推进新能源就地消纳^[4-6].然而当前储能缺少明确的市场交易机制,仅能通过明显的峰谷价差实现套利,储能装置利用效率低下,无法通过参与市场交易实现盈利^[7].因此,要保障储能产业的可持续发展,提升储能利用效率,实现储能盈利,首先需要建立安全可靠的市场交易机制.

在能源交易市场化大规模发展的背景下,国内外学者对能源交易模式以及机制已有许多研究.文献[8]设计基于区块链技术和同态加密技术的安全能源交易方法,建立能源交易系统;文献[9]提出了基于弱中心化管理的分布式新能源现货交易方法,利用区块链技术存储电力交易信息,以智能合约的形式进行结算;文献[10]利用电动汽车建立点对点能源市场,允许家庭间灵活交易,减少对能源供应商的依赖;文献[11]选择区块链作为底层数据架构,实现节点间的能源交易;文献[12]基于区块链建立分布式能源交易架构,降低信用成本,提高消纳能力.上述文献多侧重于研究电能现货交易或者中长期交易,多关注于分布式能源交易机制研究,缺乏对储能价值实现方式的探索.

基于上述考虑,本文设计基于区块链技术的非合作博弈交易模型.首先,本文以含新能源的用户节点为市场交易主体,引出共享储能的概念并提出其交易机制.其次,基于智能合约构建数字签名,进行节点身份验证,大幅提高交易的安全性,降低交易平台成本,实现微网节点间的灵活可靠交易.最后,通过构建非合作博弈模型和流程,保障参与交易节点利益最大化.

1 区块链技术

区块链技术是去中心化、分布式存储管理系统^[13].如图1所示,区块链由区块体和区块头组成,区块体存储用户之间的传递消息和交互数据,区块头记录摘要信息和其他标识符.区块链采用 Hash 函数和 Merkle 树等加密方案来保证数据的抗篡改性和一致性^[14].区块链

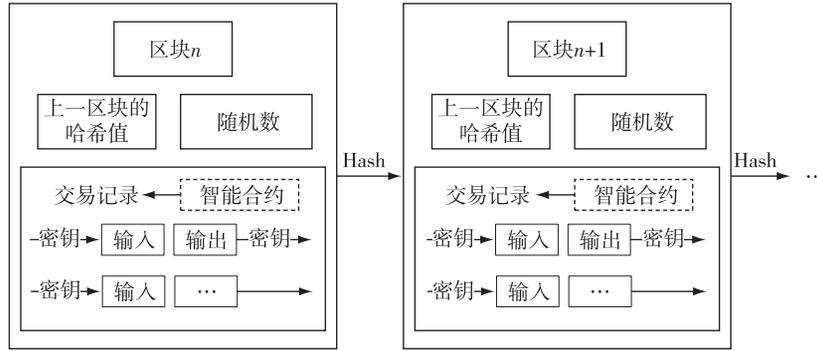


图1 区块链结构

Fig. 1 Blockchain structure

由参与网络的节点维护,方便快速归纳和保障交易的准确性和安全性。

2 共享储能

共享储能是在分布式能源广泛发展和灵活应用的背景下产生的一种储能市场化模式,可以有效提高储能设备利用率与收益^[15]。

根据微网系统供需功率平衡关系,分5种情景建立微网共享储能交易机制及储能SOC(荷电状态)动态模型。

为简化模型,首先设立两个中间变量:微网*i*在*t*时段的功率缺额与微网*i*储能能在*t*时段可用电量放出时的对应平均功率,分别表示为 $\Delta P_{i,t}$ 与 $\bar{P}_{i,t}^C$ 。

$$\Delta P_{i,t} = P_{Ri,t} - P_{Si,t}, \quad (1)$$

$$\bar{P}_{i,t}^C = (SOC_{i,t-1} - SOC_{\min}) S_{Si} \eta_{i,\text{dis}} / \Delta t, \quad (2)$$

其中: $P_{Ri,t}$ 与 $P_{Si,t}$ 分别表示微网*i*在*t*时段的功率需求与当前新能源发电功率; $SOC_{i,t-1}$ 表示微网*i*储能能在*t-1*时段的荷电状态; SOC_{\min} 表示储能荷电状态下限; S_{Si} 表示微网*i*储能容量; $\eta_{i,\text{dis}}$ 表示储能*i*的充放电效率; Δt 表示放电时间。

情景1.新能源发电与自身储能均不能满足微网自身功率需求,对外部产生共享储能需求:

$$\begin{cases} S_{\text{self},i,t} = \min \{ P_{Si}^{\max}, \bar{P}_{i,t}^C \}, \\ D_{i,t} = \Delta P_{i,t} - \min \{ P_{Si}^{\max}, \bar{P}_{i,t}^C \}, \\ S_{i,t} = 0, \\ SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} - \frac{S_{\text{self},i,t} \Delta t}{S_{Si} \eta_{\text{dis}}}, \\ \Delta P_{i,t} > 0, \min \{ P_{Si}^{\max}, \bar{P}_{i,t}^C \} < \Delta P_{i,t}, \end{cases} \quad (3)$$

其中: $S_{\text{self},i,t}$ 表示微网*i*在*t*时段储能对自身的供给功率; P_{Si}^{\max} 表示微网*i*储能最大放电功率; $D_{i,t}$ 表示微网*i*在*t*时段对共享储能的需求功率; $S_{i,t}$ 表示微网*i*

在*t*时段储能对外部需求的供给功率。

情景2.新能源发电无法满足微网自身功率需求,自身储能能够弥补功率差额且有剩余,此时段售卖储能产生收益,对外部产生储能供给:

$$\begin{cases} S_{\text{self},i,t} = \Delta P_{i,t}, \\ D_{i,t} = 0, \\ S_{i,t} = \min \{ P_{Si}^{\max}, \bar{P}_{i,t}^C \} - \Delta P_{i,t}, \\ SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} - \frac{(S_{i,t} + \Delta P_{i,t}) \Delta t}{S_{Si} \eta_{\text{dis}}}, \\ \Delta P_{i,t} > 0, \min \{ P_{Si}^{\max}, \bar{P}_{i,t}^C \} \geq \Delta P_{i,t}, R_{Si,t} > C_{Si,t}, \end{cases} \quad (4)$$

其中, $R_{Si,t}$ 与 $C_{Si,t}$ 分别表示微网*i*储能能在*t*时段参与储能供给的收益与成本。

情景3.新能源发电无法满足微网自身功率需求,自身储能能够弥补功率差额且有剩余,此时段售卖储能产生亏损,没有产生对外部储能的供给与需求:

$$\begin{cases} S_{\text{self},i,t} = \Delta P_{i,t}, \\ D_{i,t} = 0, \\ S_{i,t} = 0, \\ SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} - \frac{\Delta P_{i,t} \Delta t}{S_{Si} \eta_{\text{dis}}}, \\ \Delta P_{i,t} > 0, \min \{ P_{Si}^{\max}, \bar{P}_{i,t}^C \} \geq \Delta P_{i,t}, R_{Si,t} < C_{Si,t}. \end{cases} \quad (5)$$

情景4.新能源发电已满足微网自身功率需求且有剩余,此时段售卖储能产生盈利,对外部供给储能与新能源发电:

$$\begin{cases} S_{\text{self},i,t} = 0, \\ D_{i,t} = 0, \\ S_{i,t} = -\Delta P_{i,t} + \min\{P_{Si}^{\max}, \bar{P}_{i,t}^C\}, \\ SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} - \frac{(S_{i,t} + \Delta P_{i,t})\Delta t}{S_{Si}\eta_{\text{dis}}}, \\ \Delta P_{i,t} < 0, R_{Si,t} > C_{Si,t}. \end{cases} \quad (6)$$

情景 5. 新能源发电已满足微网自身功率需求且有剩余, 此时段售卖储能亏损, 对外部仅供给新能源发电:

$$\begin{cases} S_{\text{self},i,t} = 0, \\ D_{i,t} = 0, \\ S_{i,t} = -\Delta P_{i,t}, \\ SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1}, \\ \Delta P_{i,t} < 0, R_{Si,t} < C_{Si,t}. \end{cases} \quad (7)$$

在此定义购售电功率 $P_{i,t}$, 当 $P_{i,t} > 0$ 时, $P_{i,t}$ 表示微网 i 在 t 时段对外售电功率; 当 $P_{i,t} < 0$ 时, $-P_{i,t}$ 表示微网 i 在 t 时段对外购电功率:

$$P_{i,t} = S_{i,t} - D_{i,t}. \quad (8)$$

3 基于智能合约的储能交易机制

3.1 智能合约

智能合约是执行合约条款的计算机化交易协议, 是一种自动驱动和自动执行的程序^[16], 它是使用软件代码和计算基础设施来执行特定协议或合同的条款和条件.

智能合约作为区块链网络上的去中心化程序运行. 程序是不可变的, 并通过密码验证其不可变性以确保程序的信任^[17]. 智能合约的关键特性是在没有集中第三方干预的点对点模式下执行, 以及没有任何集中依赖的服务可用性. 智能合约自我执行和自我驱动的特性保障交易在缺少可信第三方的情况下进行.

3.2 节点身份验证

采用数字签名的方式进行交易双方节点身份验证, 验证过程如下所示:

步骤 1. 生成签名

交易发起方的密钥对为 (PK_A, SK_A) , 则交易接受方的公钥为 PK_B . 交易发起方随机选择 $k_1, k_2 \in \mathbf{Z}_q^*$, 计算得到 $K_1 = k_1P, K_2 = k_2PK_A$. 由此可得, $W_1 = e(SK_A P_k, k_2PK_B)$. 其中, $S = k_1 + SK_A H_2(W_1, m)$.

因此, 可以得到, 数字签名为 $\sigma = (K_1, K_2, S)$, 交易发起方向另一方发送数字签名及加密信息 $\delta =$

(σ, m) .

步骤 2. 签名验证

交易接受方的密钥对为 (PK_B, SK_B) , 则交易发起方的公钥为 PK_A . 在接收到来自发起方的密钥信息 $\delta = (\sigma, m)$ 后, 进行签名验证. 验证过程如式 (9) 所示:

$$\begin{cases} W_2 = e(K_2, SK_B), \\ V = SP - H_2(W_2, m)PK_A. \end{cases} \quad (9)$$

验证等式 $V = K_1$ 是否成立, 若等式成立, 则签名验证通过, 接受签名, 交易匹配成功, 交易双方进行交易; 若等式不成立, 则认为签名验证无法通过, 交易匹配失败, 双方节点可以选择退出交易或者重新提交交易信息, 再次进行交易匹配.

3.3 节点信誉值评估

若节点身份验证失败, 则会影响到其他节点的交易过程, 导致其他节点利益受损. 此外, 若节点用电量小于共享储能交易量, 会影响微网的整体收益^[18], 则将收到相应的惩罚. 在一个交易周期内, 节点上报的共享储能量和成交共享储能差额在一定范围内, 则不影响该节点的信誉值; 反之, 若节点上报的共享储能量和成交量存在巨大差额, 则会降低节点信誉值. 节点信誉值影响到节点交易匹配优先级, 优先级高的节点享有优先匹配权, 可有效提高节点效益. 节点信誉值评估公式为

$$\begin{cases} S_{i,j} = X_{i,j}Y_{i,j}, \\ X_{i,j} = \begin{cases} 100, & \frac{P_{i,j}}{E_{i,j}} \leq \lambda, \\ 100\left(1 - \alpha \frac{P_{i,j}}{E_{i,j}}\right), & \frac{P_{i,j}}{E_{i,j}} > \lambda, \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

其中: $X_{i,j}$ 表示交易信誉评估; $Y_{i,j}$ 表示节点身份验证评估, 若身份验证通过, 则 $Y_{i,j}$ 为 1, 身份验证失败, 则 $Y_{i,j}$ 为 0; $p_{i,j}$ 为成交共享储能量; $E_{i,j}$ 为上报共享储能量; α 为信誉系数; λ 为电量差额阈值.

3.4 共享储能交易机制

共享储能交易机制流程如图 2 所示.

1) 各参与交易的节点预测下一交易周期内自身的供需储能, 并根据上周期市场电量及自身策略决定下一周期预期报价.

2) 所有交易节点计算自身需购售共享储能量, 将所需能源总量及预期报价加密发送至交易平台.

3) 在交易周期内, 区块链共享储能交易平台通过所有节点已上报的报价及电量进行交易匹配.

4) 交易匹配成功后,采用数字签名进行交易节点身份验证.若交易双方身份验证通过,则判定本次匹配成功,节点双方进行交易;反之,若任意一方身份验证失败,则认为本次交易匹配失败,双方节点需重新上传电量及报价信息.

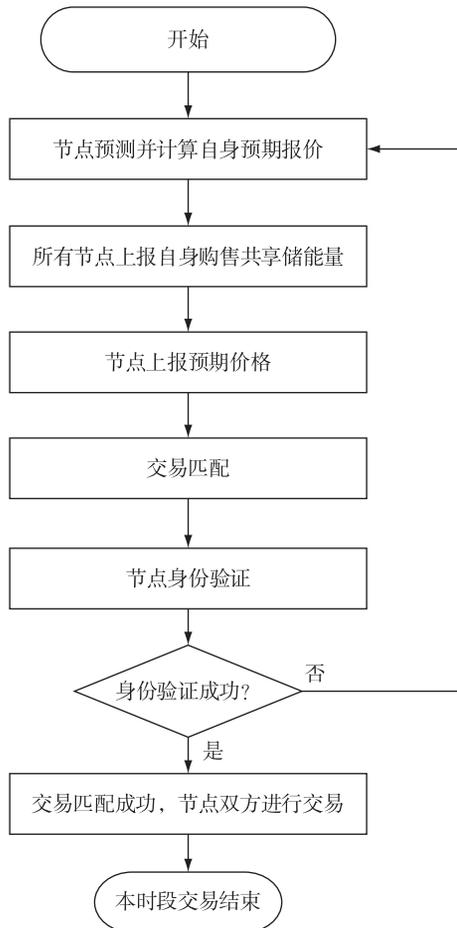


图2 共享储能交易机制

Fig. 2 Shared energy storage trading scheme

4 储能交易非合作博弈模型

4.1 非合作博弈模型

1) 博弈主体

如图3所示,储能交易非合作博弈模型中的博弈出现在交易周期*t*内存在用电需求的大用户和有购电、售电需求的分布式微网节点之间.假设能源市场中含有*N*个参与共享储能交易的微网节点和*M*个存在用电需求的大用户.微网节点的交易对象可以是拥有购电需求的其他微网节点或用电需求大用户.各个主体以实现参与者自身利益最大化为目标进行博弈.

2) 博弈空间

假设能源市场中参与交易的市场主体共享储能的购入成本为 C_b^T ,共享储能的售价为 P_s^T .

微网节点为了追求利益最大化,根据当前市场共享储能缺额情况及自身供需关系制定共享储能销售价格作为博弈空间.微网节点制定的博弈购、售储能策略如式(11)所示:

$$\gamma_{m,s} = \{p_{m-m}, p_{m-u}\}, \quad (11)$$

式中: $\gamma_{m,s}$ 为微网节点的博弈空间; p_{m-m} 为微网节点之间单位能源交易价格; p_{m-u} 为微网节点与大用户节点之间单位能源的交易价格.

大用户节点因大量的电量需求,需要购入大量来自于微网节点的共享储能以保障自身用电需求.因此,大用户节点不需要考虑售卖共享储能的价格,其博弈方向为以最低价格购进共享储能,大用户节点的博弈策略如式(12)所示:

$$\gamma_{u,s} = \{p_{m-u}\}, \quad (12)$$

式中, $\gamma_{u,s}$ 为大用户节点的博弈空间.

3) 目标函数

微网节点和大用户节点均以实现自身利益最大化为目标进行非合作博弈.微网节点以实现购入储能价格最小化、售卖共享储能价格最大化为目标,大用户节点以储能价格最小化为策略目标.微网节点目标函数、用户节点目标函数分别如式(13)和(14)所示:

$$\max \delta_{m,i} = \max \left(\sum_{j=1}^m C_{m1} p_{m-u_j} + C_{m2} p_{m_i-m_j} \right) - \min \left(\sum_{i=1, i \neq j}^n C_{m3} p_{m_i-m_j} \right), \quad (13)$$

$$\min \delta_{u,j} = \min \left(\sum_{i=1}^m C_u p_{u-m_i} \right), \quad (14)$$

式中: $\delta_{m,i}$ 为微网节点*i*的收益; C_{m1} , C_{m2} 以及 C_{m3} 分别代表微网*i*与大用户*j*、微网*i*与微网*j*之间共享储能销售量以及微网*i*与微网*j*间成交的共享储能购入量; $\delta_{u,j}$ 为大用户节点*j*的收益; C_u 为大用户*j*共享储能购入量.

4.2 非合作博弈流程

本文所提出的微网非合作博弈流程如图4所示.

1) 各交易节点设置初始的博弈策略集合.参与交易的节点生成若干交易策略,通过上交易周期内数据求解纳什均衡,选择最优策略上报.

2) 各交易节点计算自身共享储能能量,并根据最优策略上报储能值和购售信息.

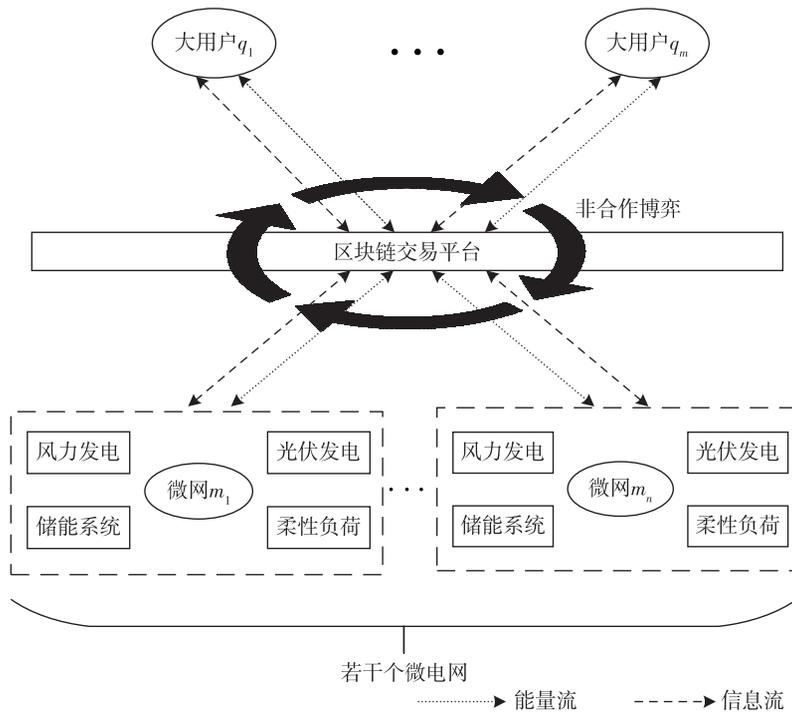


图3 微网非合作博弈架构

Fig. 3 Non-cooperative game architecture for microgrids

3)各节点计算自身目标函数值,并参与交易匹配。

4)易匹配成功后,计算交易匹配盈利范围.若交易价格与目标函数差值在可接受范围内,则交易双方达成统一协议,生成智能合约;反之,若任一方的交易价格与策略目标差值过大,则可以选择放弃交易,更新节点博弈策略。

5)交易成功,则本交易周期结束,节点推出匹配.交易失败的节点在更新博弈策略后,可选择二次报价,再次进行交易匹配.若无需更新博弈策略,则可选择放弃交易或者再次交易。

4.3 纳什均衡求解

当节点交易策略达到纳什均衡点时,其他交易节点无法通过单方面改变交易策略来提升自身收益.即当考虑到其他交易节点的均衡策略,每一交易节点均可在纳什均衡点处获得最大收益.纳什均衡点求解方法如下:

步骤 1.参与交易的节点随机选择策略作为初始交易策略。

步骤 2.交易策略迭代:

1)每一交易节点观察上阶段其他交易节点的购售策略;

2)所有交易节点计算各自最优反应策略。

步骤 3.重复迭代.迭代至 $n-1$ 次,交易节点从自己 $n-1$ 次策略集中选择最优反应策略作为自身第 n 次交易策略。

步骤 4.求得纳什均衡点。

5 算例分析

为了验证所提模型的有效性,对包含 3 个有电能需求用户节点和 3 个有售能需求的节点的共享储能交易市场进行仿真实验.在仿真实验中,对电能分别采用实时、分时和峰谷 3 种不同定价方式,研究分析不同定价方式下共享储能的合约交易。

在共享储能交易市场中,交易时段 t 可以是 1 d,也可以是 1 h 或者峰时、谷时、平时中的任意一个时段.本文研究的共享储能交易合约期为 24 h,电能供应节点的交易成本及报价参数如表 1 所示。

表 1 电能供应节点报价成本参数

Table 1 Quotation & cost parameters for power supply nodes

售能节点	成本/ (元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)		价格/ (元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)		交易量/ (MW·h)	
	储能	新能源	储能	新能源	储能	新能源
1	239	132	340	190	95	55
2	245	125	342	220	70	35
3	230	119	320	185	65	50

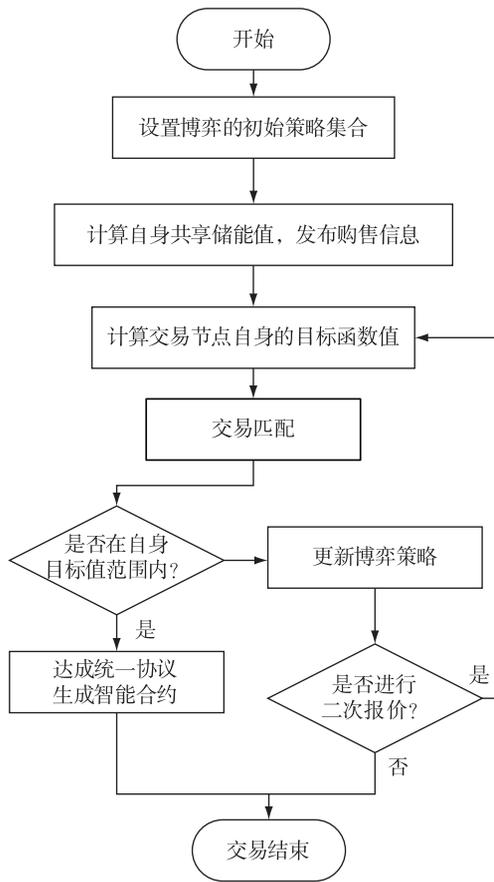


图4 非合作博弈流程

Fig. 4 Non-cooperative game flow

新能源发电售电价格的上下限分别为 470 和 140 $\text{元}\cdot\text{MW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; 共享储能价格上下限分别为 470 和 250 $\text{元}\cdot\text{MW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$. 在本文中, 假设每个需求节点在同一时期可以从每个售能节点购买的能源上限相

表2 实时定价下共享储能合约价格与交易量

Table 2 Contract price and trading volume of shared energy storage under real-time pricing

售能节点	共享储能合约价格/($\text{元}\cdot\text{MW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)			共享储能合约交易量/($\text{MW}\cdot\text{h}$)		
	需求节点 1	需求节点 2	需求节点 3	需求节点 1	需求节点 2	需求节点 3
1	267.26	286.23	278.95	926.54	856.33	723.54
2	294.21	288.75	290.50	711.32	680.52	545.33
3	272.58	255.92	262.92	1 074.66	1 099.30	946.34

表3 新能源发电合约价格与交易量

Table 3 Contract price and trading volume of new energy

售能节点	新能源合约价格/($\text{元}\cdot\text{MW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)			新能源交易量/($\text{MW}\cdot\text{h}$)		
	需求节点 1	需求节点 2	需求节点 3	需求节点 1	需求节点 2	需求节点 3
1	184.38	184.10	182.84	845.36	954.13	916.52
2	214.48	200.55	213.36	546.56	652.98	593.65
3	179.55	181.79	180.74	1 033.62	1 136.56	1 082.46

同. 在实时、分时、峰谷 3 种定价方式下, 电能交易价格曲线如图 5 所示.

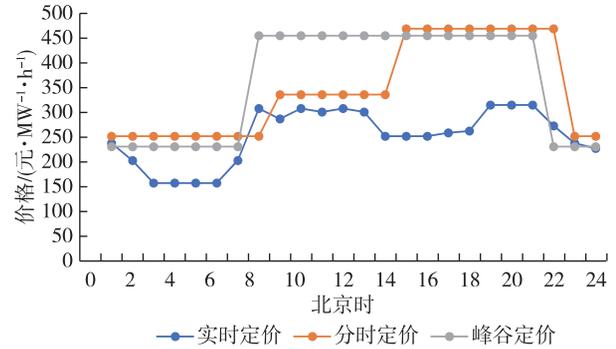


图5 电能交易价格

Fig. 5 Electricity transaction pricing schemes

5.1 合约价格与数量分析

本节基于博弈均衡分析合约价格与合约数量之间的关系. 实时定价作为预测的能源交易市场价格, 共享储能的合约价格与合约交易量如表 2 所示. 新能源的合约价格和能源交易量如表 3 所示.

受益于最低的初始能源生产成本和较低的边际成本增长率, 在能源多边交易市场中, 售能节点 3 的最终合约价格在 3 个节点中是最低的, 最终合约交易量是最高的. 然而, 对于售能节点 2 而言, 由于其最高的初始成本, 其最终合约价格是售能节点中最高的. 从表 2 和表 3 可以看出, 合约价格是需求节点在不同售能节点下确定合约数量的决定性因素. 售能节点提供的价格越高, 需求节点购买的数量就越少, 反之, 售能节点市场份额就越小. 因此, 成本越低的售能节点在市场竞争中的优势就越大.

5.2 共享储能交易市场价格的影响

考虑到共享储能交易价格的影响,对不同共享储能价格下的合约交易进行分析,证明模型有效性.3种情景的共享储能交易价格分别采用实时定价、分时定价与峰谷定价方式.

5.2.1 博弈均衡分析

实时电价下的博弈均衡如表2所示;分时电价下的博弈均衡如表4所示;峰谷电价下的博弈均衡如表5所示.比较3种不同定价方式下的共享储能交易市场,当共享储能定价方式为实时定价方式时,多边合约电价最低.由于平均实时价格较低,节点参与储能交易市场竞争以获得市场份额,从而导致更低的合约价格.当储能交易市场价格提高时,节点通过提高合约价格以扩大市场份额,从而增加当前交易周期的利润.上述讨论中值得注意的是,储能交易市场的价格对于不同参与交易节点决定不同合约价格至关重要,因为储能交易市场影响着不同节点的市场份额.此外,结合预测的共享储能交易价格和不同情况下的多边交易结果,可以看出合约价格在大多数时期都低于共享储能实时交易价格.尽管多边合约对售能节点来说实现利益最大化,但长期的多边合约交易可以防止市场风险,降低价格.同时也有利于参与交易的节点长期稳定发展.

5.2.2 成本分析

3种不同储能定价方式下的有购能需求的用户节点成本比较如图6所示.在储能交易价格为实时价格的情况下,所有需求用户节点的成本都最低.当现货价格较低时,如使用实时价格时,售能节点会降

低价格以在竞争中获得市场份额,从而导致整个市场价格下降.

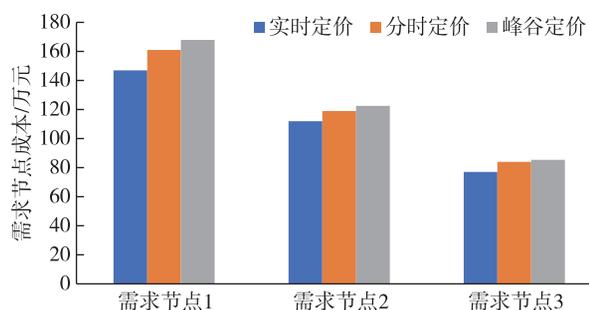


图6 不同定价方式下需求用户节点的成本比较

Fig. 6 Cost comparison for demanding nodes under different pricing schemes

5.2.3 利润分析

不同定价方式下售能的微网节点的新能源发电利润和储能利润比较分别如图7和图8所示.从新能源发电多边交易利润来看,节点3的利润最大.因为节点3具有更低的边际成本,可以提供更低的报价,从而在多边交易中获得更多的市场份额.从储能多边交易的利润来看,当共享储能交易市场采用分时电价时,节点3的利润最高,因为节点3具有最大合约功率.对于边际成本较高的其他2个节点来说,采用峰谷定价方式可以实现利润最大化,因为在峰谷定价方式下售能的微网节点1与售能的微网节点2的合约价格是3个情景中最高的.

但在峰谷定价情景下,合约价格略高于其他情景下的合约价格.因此,即使节点1与节点2的合约

表4 分时定价下共享储能合约价格与交易量

Table 4 Contract price and trading volume of shared energy storage under time-of-use pricing

售能节点	共享储能合约价格/(元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)			共享储能合约交易量/(MW·h)		
	需求节点1	需求节点2	需求节点3	需求节点1	需求节点2	需求节点3
1	323.82	333.55	320.32	1 220.35	858.56	802.78
2	319.55	314.86	318.50	996.52	753.56	653.52
3	285.11	283.71	289.66	1 174.96	1 189.32	1 156.34

表5 峰谷定价下共享储能合约价格与交易量

Table 5 Contract price and trading volume of shared energy storage under peak-valley pricing

售能节点	共享储能合约价格/(元·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)			共享储能合约交易量/(MW·h)		
	需求节点1	需求节点2	需求节点3	需求节点1	需求节点2	需求节点3
1	322.91	332.92	327.32	1224.65	883.46	653.78
2	333.55	337.82	332.64	956.63	683.76	532.92
3	306.81	298.41	305.06	926.81	965.32	943.59

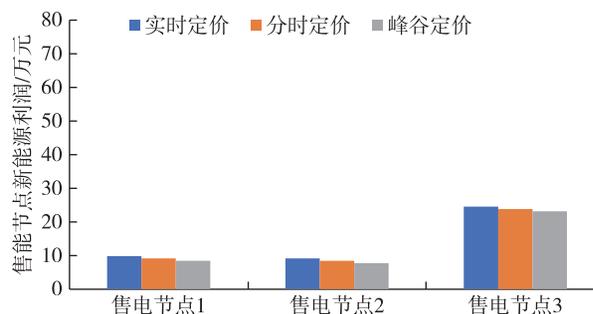


图7 不同定价方式下售能节点的新能源发电利润比较

Fig. 7 New energy profit comparison for selling nodes under different pricing schemes

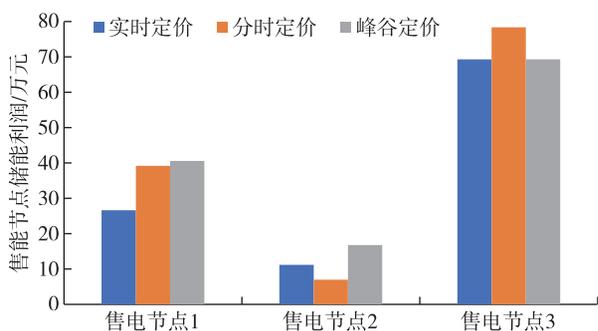


图8 不同定价方式下售能节点的储能利润比较

Fig. 8 Energy storage profit comparison for selling nodes under different pricing schemes

价格较高,但也远低于峰值时电价,所以节点1与节点2仍然有一定的市场份额.总的来说,节点3的利润最高,因为其边际成本最低,在博弈中可以提供最低的合约价格.节点2的边际成本最高,相应的合约价格也最高,致使其市场份额最小,利润最低.

6 结论

随着分布式能源的快速发展,能源就地消纳难、储能收益低使得能源结构转型受限,抑制能源产业的升级优化.本文设计基于区块链技术的非合作博弈共享储能交易模型,以微网作为节点,引入共享储能的概念,构建以区块链技术作为底层技术的共享储能交易平台,提高储能利用效率与收益,同时提高交易平台的可信度并保障交易用户信息隐私.其次,将数字签名技术写入智能合约,进行交易节点身份验证,提高节点身份的安全性和可靠性,保障储能交易的安全性.最后,基于共享储能交易机制,搭建非合作博弈模型,实现交易节点间的非合作博弈,促进节点进行真实报价,推动储能交易进程,保障各节点最优策略,实现节点利益最大化.通过算例分析表

明,本文所提出的基于区块链技术的非合作博弈储能交易模型能够有效提高分布式能源的消纳水平,提高储能利用效率与收益,推动电力产业结构优化,为实现储能产业可持续发展与能源交易转型提供有效途径.

参考文献

References

- [1] 李鹏,韩鹏飞,陈安伟,等.含高密度间歇性能源的交流混合微网模糊随机优化运行[J].中国电机工程学报,2018,38(10):2956-2965,3146
LI Peng, HAN Pengfei, CHEN Anwei, et al. Fuzzy random optimal operation of hybrid AC/DC microgrid with high density intermittent energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2956-2965, 3146
- [2] Shokrzadeh S, Bibeau E. Sustainable integration of intermittent renewable energy and electrified light-duty transportation through repurposing batteries of plug-in electric vehicles[J]. Energy, 2016, 106: 701-711
- [3] Pearre N, Swan L. Reimagining renewable electricity grid management with dispatchable generation to stabilize energy storage[J]. Energy, 2020, 203: 117917
- [4] 李山山,李华强,金智博,等.基于共享经济理念的园区分布式能源共享服务机制[J].中国电机工程学报,2022,42(1):56-71
LI Shanshan, LI Huaqiang, JIN Zhibo, et al. Distributed energy sharing service mechanism for park based on the concept of sharing economy [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 56-71
- [5] Yli-Huoma J, Ko D, Choi S, et al. Where is current research on blockchain technology? A systematic review [J]. PLoS One, 2016, 11(10): e0163477
- [6] 王尧,樊伟,王佳伟,等.考虑风光不确定性的分布式能源集成虚拟电厂收益-风险均衡模型[J].可再生能源,2020,38(1):76-83
WANG Yao, FAN Wei, WANG Jiawei, et al. Revenue-risk equilibrium model for distributed energy integrated virtual power plant benefits considering wind and light uncertainty [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(1): 76-83
- [7] 李更丰,别朝红,王睿豪,等.综合能源系统可靠性评估的研究现状及展望[J].高电压技术,2017,43(1):114-121
LI Gengfeng, BIE Chaohong, WANG Ruihao, et al. Research status and prospects on reliability evaluation of integrated energy system [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 114-121
- [8] Chen S J, Shen Z Y, Zhang L, et al. A trusted energy trading framework by marrying blockchain and optimization [J]. Advances in Applied Energy, 2021, 2: 100029
- [9] Liu J Y, Cai Z Y, Liu D N, et al. Research on distributed energy transaction technology based on blockchain [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 236: 02011
- [10] Brousmiche K, Menegazzi P, Boudeville O, et al. Peer-to-

- peer energy market place powered by blockchain and vehicle-to-grid technology [C] // 2020 2nd Conference on Blockchain Research & Applications for Innovative Networks and Services (BRAINS). September 28-30, 2020, Paris, France. IEEE, 2020: 53-54
- [11] Li Z G, Chen S, Zhou B X. Electric vehicle P2P electricity transaction model based on superconducting energy storage and consortium blockchain [C] // 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. October 16-18, 2020, Tianjin, China. IEEE, 2020: 1-2
- [12] 王蓓蓓, 李雅超, 赵盛楠, 等. 基于区块链的分布式能源交易关键技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 53-64
WANG Beibei, LI Yachao, ZHAO Shengnan, et al. Key technologies on blockchain based distributed energy transaction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 53-64
- [13] Hewa T, Ylianttila M, Liyanage M. Survey on blockchain based smart contracts: applications, opportunities and challenges [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2021, 177: 102857
- [14] Pee S J, Kang E S, Song J G, et al. Blockchain based smart energy trading platform using smart contract [C] // 2019 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC). February 11-13, 2019, Okinawa, Japan. IEEE, 2019: 322-325
- [15] 孙偲, 陈来军, 邱欣杰, 等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型 [J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 360-366
SUN Cai, CHEN Laijun, QIU Xinjie, et al. A generation-side shared energy storage planning model based on cooperative game [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 360-366
- [16] 马天男, 彭丽霖, 杜英, 等. 区块链技术下局域多微电网市场竞争博弈模型及求解算法 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 191-203
MA Tiannan, PENG Lilin, DU Ying, et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 191-203
- [17] Guo N X, Wang Y N, Yan G F. A double-sided non-cooperative game in electricity market with demand response and parameterization of supply functions [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106565
- [18] Lu Z G, Shi L N, Geng L J, et al. Non-cooperative game pricing strategy for maximizing social welfare in electrified transportation networks [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130: 106980

Non-cooperative game trading model for shared energy storage based on blockchain

WANG Xun¹ LIU Jin¹ SHEN Wei¹

¹ State Grid Huzhou Electric Power Supply Company, Huzhou 313000

Abstract The energy storage is perplexed by low utilization efficiency and poor profit due to its high cost in energy storage and lack of trading platform. Here, a non-cooperative game trading model based on blockchain is designed for shared energy storage. Taking microgrids as nodes, shared energy storage uses digital signature to verify node identity, which can effectively guarantee the transaction security. The trading mechanism for shared energy storage is established on the self-driven and self-executing smart contract. The non-cooperative game model can maximize the benefits of each node, improve energy storage profit, and motivate the node users to participate in transactions, thus help optimize the industrial structure. Example analysis shows that the blockchain-based non-cooperative game trading model can effectively realize participation of energy storage in market transactions, improve energy storage utilization efficiency, increase energy storage profit, and provide technical and theoretical support for further development of energy storage industry.

Key words shared energy storage; blockchain; smart contract; non-cooperative game